

## КОМПОНОВКА ОБНОВЛЕННОЙ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ КАРТЫ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО СЕГМЕНТА АТЛАНТИКИ ПО ДАННЫМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

© 2018 С.Ю. Соколов

*Геологический институт РАН, Москва, 119017;  
e-mail: sysokolov@yandex.ru*

Новые данные о потенциальных геофизических полях позволяют существенно актуализировать векторизацию тектонических элементов экваториального сегмента Атлантики, дешифрируемых в структуре аномалий. С этой целью использованы аномалии силы тяжести в свободном воздухе по данным спутниковой альтиметрии, аномалии Буге, изостазия, сейсмотомография, остаточные аномалии Буге, аномальное магнитное поле  $\Delta T_a$ , данные о веществе верхней мантии, скоростях спрединга и возрастах океанического фундамента. Выделенные тектонические элементы скомпонованы в карту, в которой они условно делятся на две группы: главные и дополнительные. Главные элементы: рифтовые сегменты Срединно-Атлантического хребта (САХ), одиночные трансформные разломы и, отдельно, их активные части, нетрансформные смещения, зона САХ с флангами и отдельные магматические возвышенности имеют геодинамическую интерпретацию, согласованную с представлениями о параметрах основных действующих горизонтальных сил тектоники плит и ее комбинации с ветвями суперплюмов. Дополнительные элементы — полиразломные системы, разломы-«отшельники», параллельные ветви и дискордантные нарушения, как симметричные, так и несимметричные, палеооси спрединга, впадины пулл-апарт — могут интерпретироваться, как результат действия дополнительных факторов тектогенеза.

*Ключевые слова: тектоническая карта, геофизические поля, аномалии Буге, факторы тектогенеза.*

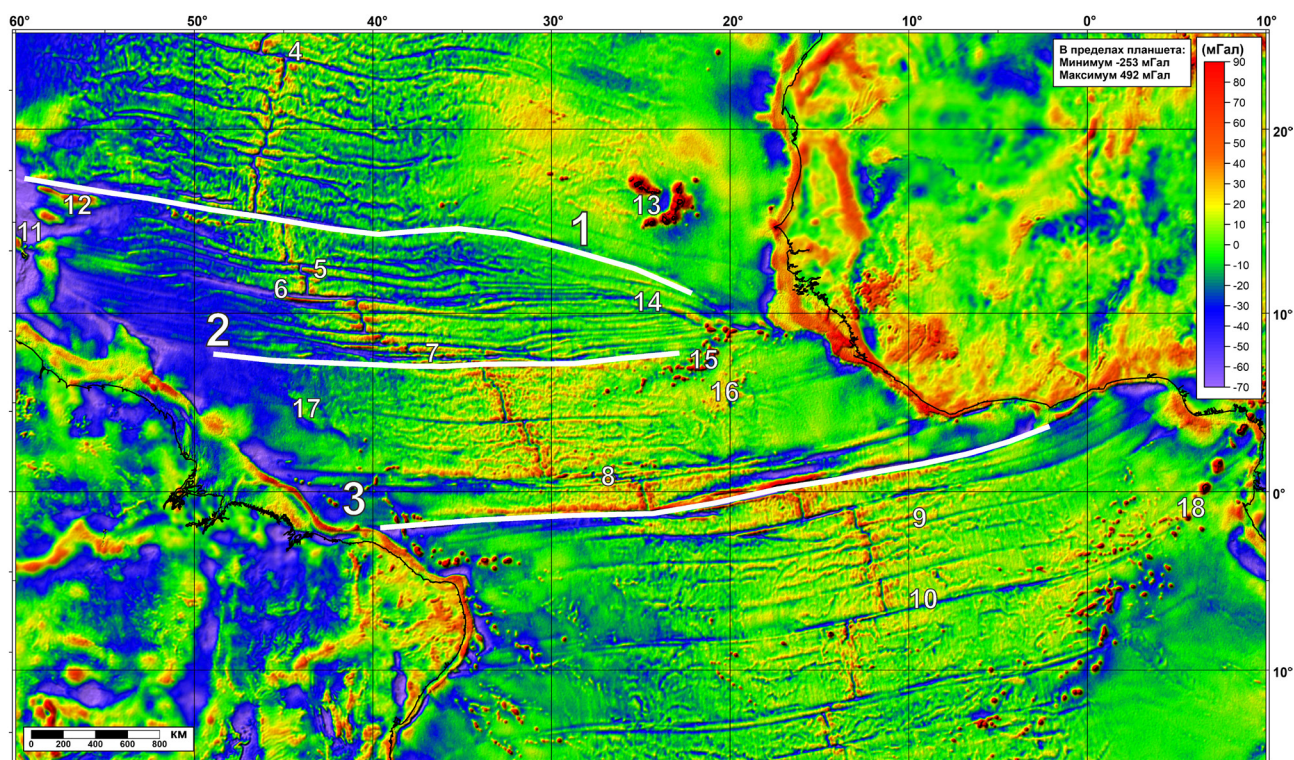
### ВВЕДЕНИЕ

Экваториальным сегментом Атлантики (ЭСА) условно называется пространство, ограниченное с севера разломом  $15^{\circ}20'$  (Зеленого Мыса) и с юга разломом Романш (рис. 1). Главной причиной, приведшей к обособлению ЭСА, является несинхронный старт спрединговых процессов при раскрытии Атлантики (Соколов, 2017). Для пространства к северу от разлома Зеленого Мыса возраст начала раскрытия составляет  $\sim 175$  Ма (средняя Юра) (Müller et al., 2008), на юг от разлома Романш возраст раскрытия меняется от  $\sim 112$  Ма до  $\sim 120$  Ма. Раскрытие ЭСА между указанными границами точно не определено из-за ненадежных магнитных данных, но оценивается в пределах от  $\sim 118$  Ма до  $\sim 105$  Ма (Antobreh et al., 2009), и до  $\sim 85$  Ма — момента окончательного отрыва Африки и Южной Америки по соприкосновению вдоль длинной активной части разлома Романш (Бонатти, 1996; Antobreh et al., 2009).

Характер основных морфоструктур дна и фундамента ЭСА, выраженный в спутниковой

альтиметрии, отличается по разные стороны от демаркационных разломов. Внутри него с очевидностью выделяется еще одна граница по разлому Богданова (рис. 1), к северу от которой резко преобладают полиразломные трансформные системы и короткие рифтовые сегменты при их большом общем смещении в субширотном направлении, а к югу ситуация морфологически сходная с фоновыми параметрами тектонических элементов Срединно-Атлантического хребта (САХ). Отметим также появление дополнительных разломных трогов на восточном фланге САХ между демаркационными элементами 1 и 2 (рис. 1) и конвергенцию пассивных частей там же. По данным (Мазарович и др., 1997) сложная структура океанической коры в пределах ЭСА указывает на существенные изменения параметров геодинамического режима при раскрытии этой части Атлантического океана.

По данным геолого-геофизических характеристик вдоль оси САХ и томографического разреза мантии вдоль него (Соколов, 2016) ЭСА на



**Рис. 1.** Аномалии силы тяжести в свободном воздухе по данным спутниковой альтиметрии (Sandwell, Smith, 2009) в ЭСА и его обрамлении. Демаркационные разломы: 1 — разлом 15°20' (Зеленого Мыса), 2 — разлом 7°10' (Богданова), 3 — разлом Романш. Другие объекты: 4 — разлом Кейн, 5 — сдвоенная система разломов Марафон и Меркурий, 6 — разлом Вима, 7 — полиразломная система Долдрамс-Вернадского-7°24'-Богданова-6°52', 8 — полиразломная система Сан-Паулу, 9 — разлома Шарко, 10 — разлома Вознесения, 11 — Антильская дуга, 12 — хребет Барракуда, 13 — острова Зеленого Мыса, 14 — уступ Кабо-Верде, 15 — горы Батиметристов, 16 — возвышенность Сьерра-Леоне, 17 — возвышенность Сеара, 18 — Камерунская линия вулканов.

вдольосевых графиках и разрезах обособляется следующим образом.

1. ЭСА практически не содержит типичных сочетаний геофизических параметров, характерных для большинства котловин Атлантики и образует экваториальный «холодный» пояс с линеаментами северо-западной ориентации. Вдоль демаркационных разломов ЭСА распространено сочетание геофизических параметров, свойственное преддуговым областям.

2. На разрезе атрибута  $\delta(Vp/Vs)$  вдоль САХ в мантии над уровнем ~700 км наблюдаются «холодные» линзы мощностью 200–300 км (средняя глубина ~470 км) в районе экваториальных разломов с большим смещением — Романш, Сан-Паулу, Богданова и Вима.

3. ЭСА имеет повышенную плотность полиразломных и сдвоенных трансформных систем там, где в верхней мантии по данным сейсмографии наблюдаются «холодные» линзы.

4. ЭСА имеет аномальные механизмы очагов землетрясений сдвиговой кинематики вдоль северного обрамления и высокомагнитудной сейсмичностью при пониженной частотой событий по сравнению с другими сегментами Атлантики.

5. Субмеридиональная компонента движения по данным GPS на северном обрамлении ЭСА переходит в субширотную с западной направленностью, что объясняет механизмы очагов и наличие транспрессионного режима вдоль разлома Зеленого Мыса.

6. Площадное распределение аномалий атрибута  $\delta(Vp/Vs)$  на глубине 470 км показывает, что ЭСА содержит обширный «холодный» блок с северо-западной ориентацией.

Указанные свойства ЭСА, обособляющие его от обрамления к северу и югу, являются основой общей сегментации Атлантики и хорошо дополняются структурным рисунком потенциальных полей (рис. 1). Изученность ЭСА этими измерениями имеет практически равномерное покрытие в пределах района в отличие от набортных маршрутных и полигонных съемок. Это дает возможность обоснованно сравнивать различные районы ЭСА, исключая из рассмотрения контраст плотности данных, который существует в набортных съемках и может служить источником интерпретационных ошибок. В настоящей работе проведен анализ структурных элементов ЭСА, выделяемых на потенциальных полях, и их компоновка в виде



тектонической карты с расширенной легендой по сравнению с более ранними тектоническими схемами.

### АНОМАЛИИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ В СВОБОДНОМ ВОЗДУХЕ

При неравномерной плотности маршрутных промеров в ЭСА и его обрамлении объективная картина для сравнительного анализа структур в разных частях акватории формируется данными дистанционных зондирований (Sandwell, Smith, 2009) при региональных масштабах (детальность гридов от 1 до 10 дуговых минут). Плотность спутниковых альтиметрических данных может считаться равномерной вплоть до масштабов 1–2 млн в соответствии с шагом итогового грида, равным 1 дуговой минуте. Основным набором данных этого типа является альтиметрия, пересчитанная в аномалии силы тяжести в свободном воздухе (рис. 1). Точность этих аномалий определяется в 2–4 мГал. Использовалась версия 23 глобального грида аномалий в свободном воздухе. Поле аномалий в свободном воздухе для океанической части в основном отображает наиболее контрастную плотностную границу — рельеф дна, где имеет место перепад плотностей от  $1.03 \text{ г/см}^3$  (вода) до средней плотности коры. В океане это значение принято равным  $2.75 \text{ г/см}^3$ , хотя для глубоководной акватории с небольшим осадочным чехлом целесообразно его увеличение до  $2.80\text{--}2.85 \text{ г/см}^3$ . Для исследования собственно плотностных неоднородностей коры и верхней мантии производится устранение эффекта водного слоя, параметры которого, в частности, подошва, известны из независимого метода измерений — эхолотирования. Этот пересчет поля аномалий в свободном воздухе будет описан далее в статье. Аномалии в глубоководной части океана отражают структуры рельефа дна (рис. 1).

В первую очередь анализ поля показывает четкую сегментацию ЭСА, которая выделяется по различному среднему уровню поля, по плотности линеаментов и насыщенности пространства дискордантными зонами — трогами с изгибающейся в плане формой, не совпадающей по ориентации ни с трансформными разломами, ни с рифтовыми сегментами (рис. 1). Наблюдаемые особенности поля, выходящие за рамки рабочей гипотезы, породили ряд вопросов о генезисе следующих форм океанического субстрата:

- конвергенция пассивных частей трансформных разломов в ЭСА к востоку от САХ;
- увеличение числа трогов в зонах ундуляций пассивных частей разломов;
- косоориентированные по отношению к главным структурным элементам разломные

зоны и трог, а также приуроченные к ним внутриплитные землетрясения;

- возникновение структур типа пулл-апарт в пассивных частях трансформных разломов;
- наложенные цепочки вулканических построек, ориентированные косо к основным структурным элементам, а также вдоль бортов крупных трансформных разломов.

Количество нетривиальных особенностей достаточно велико, чтобы в одной модификации рабочей гипотезы сразу устранить диспропорцию с фактами. Тем не менее, для понимания причин расхождения необходимо указанные особенности классифицировать и построить их векторную карту, которую можно сопоставлять в пространстве с геофизическими полями, имеющими четкий физический смысл при интерпретации.

### АНОМАЛИИ БУГЕ

Аномалии Буге являются пересчетом гравитационного поля, сделанным для устранения из измеренного сигнала вклада рельефа и выделения компоненты сигнала, связанной с плотностными неоднородностями в коре и верхней мантии. Предполагается, что гравитационный эффект рельефа, известного по измерениям другими методами, является не предметом исследования, а значением поправки, которую вводят для устранения его эффекта из измерений. Основой для расчета аномалий Буге является наличие независимого измерения кровли океанической коры (рельефа дна) эхолотным промером, которое используется для расчета мысленного эксперимента по «досыпанию» верхних оболочек слоистой среды недостающими массами до средних значений плотности нижних толщ. Поскольку современные глобальные гриды рельефа дна, полученные с использованием методики «predicted topography» (Smith, Sandwell, 1997) состоят из эхолотных промеров с большими пустотами, в которых значения глубин заполнены интерполяцией по альтиметрии, они не являются полностью независимой информацией о глубинах. Для расчета использовалась матрица аномалий силы тяжести в свободном воздухе, пересчитанная на сетку  $5'$ , и матрица ЕТОР05 (ЕТОР05, 1993), имеющая также детальность в  $5'$  и не содержащая глубин, предсказанных по альтиметрии. Эта матрица приведена низкочастотной фильтрацией к пространственному спектру сходного со спектром гравитационных аномалий вида. Расчет аномалий Буге был проведен для каждой ячейки грида интегрированием гравитационного эффекта призм с разной глубиной в области с радиусом 166 км, для плотности воды  $1.03 \text{ г/см}^3$ , коры

2.75 г/см<sup>3</sup>. Полученная поправка была добавлена к исходному гравитационному полю в свободном воздухе.

## МАНТИЙНЫЕ АНОМАЛИИ БУГЕ

Вторым шагом расчета был учет недостающих масс осадочного слоя по данным мощностей в океанах (Divins, 2003) и возрастов магматического субстрата (Müller et al., 2008), на котором залегают осадки. Исходным пунктом расчетов было формирование модели средней плотности осадочного слоя в зависимости от мощности и возраста. Вначале были заданы значения пластовых скоростей в основании чехла по формуле Фауста  $V_{пл} = 46 \cdot (ZT)^{1/6}$ , где  $T$  — возраст (годы) по данным (Müller et al., 2008),  $Z$  — глубина подошвы чехла (метры) по данным (Divins, 2003). Для малых значений  $V_{пл}$  устанавливался порог 1500 м/сек. Далее для каждой ячейки грида осадков, совпадающей с гридом поля аномалий Буге, была вычислена средняя скорость в толще осадков  $V_{ср} = 1500 + (V_{пл} - 1500)/2$ , исходя из предположения о линейном законе изменения скорости от дна до подошвы чехла. Полученные средние скорости были использованы для расчета средних плотностей по формуле  $\rho_{ос} = 0.000357 \cdot V_{ср} + 0.965$  (г/см<sup>3</sup>), которая является одной из линейных аппроксимаций зависимости плотности от скорости для кайнозойских терригенных пород. Окончательная поправка к обычной аномалии Буге за

влияние осадочного слоя была вычислена как  $dG_{ос} = 0.0419 \cdot (2.75 - \rho_{ос}) \cdot H$ , где  $H$  — мощность осадочного чехла. Поправка имеет положительное значение и «досыпает» недостающие массы осадков до среднего значения по коре, аналогично процедуре поправки за водный слой с рельефом дна в виде подошвы.

Третьим этапом расчета мантийных аномалий Буге является «досыпание» масс разницы средних плотностей между мантией и вышележащими слоями, уже приведенными к средней коровой плотности. Этими слоями являются водный (рельеф дна), осадочный и слой консолидированной коры с условной мощностью 6000 м. Корректируемый за недостающие массы слой над мантией, таким образом, имеет мощность как сумму вышеуказанных слоев. Перепад плотностей кора-мантия составлял 0.5 г/см<sup>3</sup>. Итоговый грид мантийных аномалий Буге представлен на рис. 2. В этом покрытии после проведенных расчетов максимально усилен эффект от собственно плотностных неоднородностей коры и верхней мантии за счет устранения влияния слоев, геометрия которых известна из других методов — эхолотирования и сейсмопрофилирования.

Рассчитанные мантийные аномалии Буге (рис. 2) обладают следующими особенностями. Глубокий минимум аномалий Буге вдоль оси САХ указывает на зону прогретого и частично расплавленного вещества мантии, которое характерно для рифтогенной структуры. Эффек-

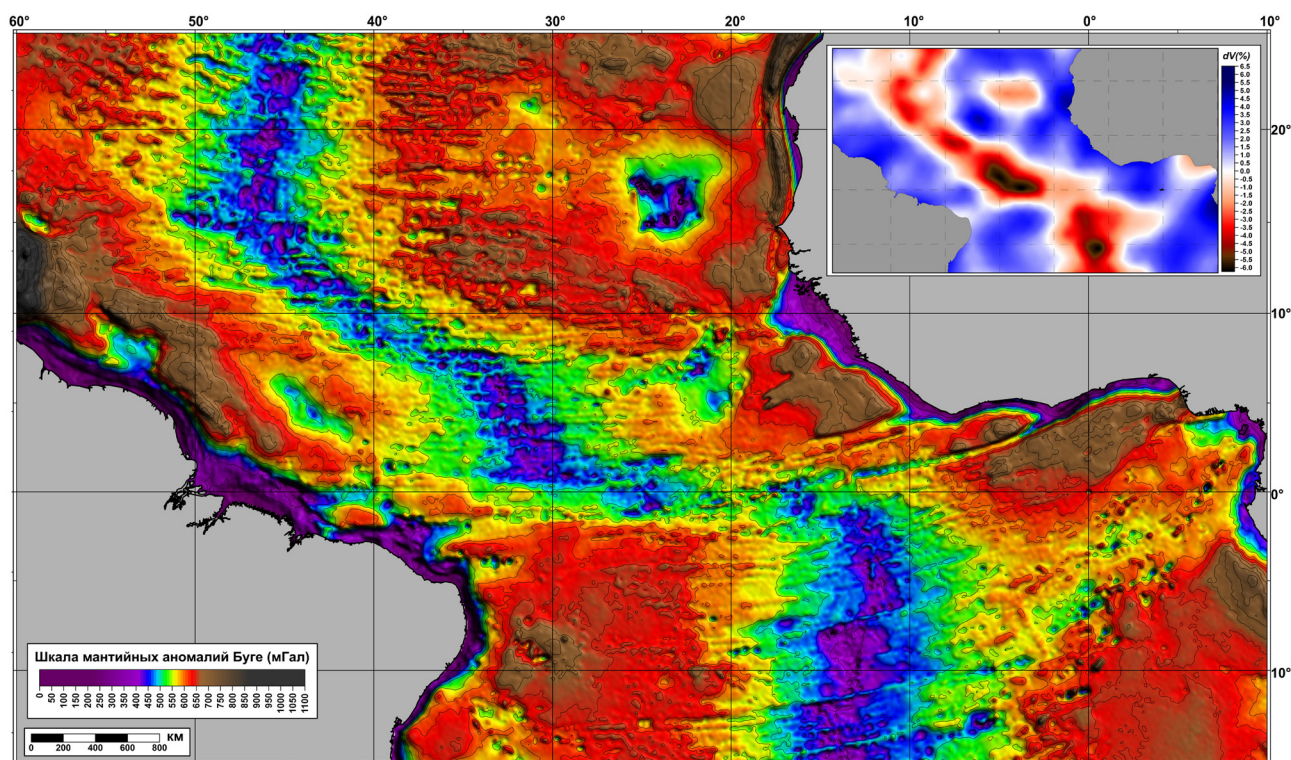


Рис. 2. Мантийные аномалии Буге в ЭКА и его обрамлении. На врезке показан срез сейсмотомографической модели SL2013sv (Schaeffer, Lebedev, 2013) вариаций скоростей S-волн на глубине 75 км.



тивная ширина этого минимума увеличивается к югу в соответствии с удалением от полюса вращения плит обрамления Атлантики (около 60° с.ш.) и увеличением скорости спрединга. Это говорит о зависимости ширины зоны рифтогенной активации от скорости спрединга — одного из главных независимых параметров, влияющего на характер тектогенеза. Вдольосевые значения аномалий Буге показывают, что ЭСА является сегментом с максимальным уровнем поля Буге вдоль САХ, а наблюдаемые в его пределах (рис. 2) минимумы являются локальными, наложенными на общий тренд. Данный тренд в пределах САХ имеет и более глубокие минимумы в местах пересечения с ветвями суперплюмов Исландии и Азорских островов. Глубина минимумов определяется другим независимым параметром — термальным и разуплотненным состоянием мантии в пределах плюмовых структур. Осевого аномалии Буге соответствуют структуры, относимые к зоне САХ с флангами, и оконтуриваются по изобате 4000 м.

Вдольосевому минимуму Буге на сейсмографическом срезе на глубине 75 км, построенном по данным (Schaeffer, Lebedev, 2013), соответствует аналогичный по пространственной конфигурации минимум вариации скоростей S-волн (рис. 2, врезка). Причем глубина этих минимумов пропорциональна минимумам аномалий Буге, что вполне ожидаемо по общим теоретическим соображениям о связи плотности и скорости. Исключением является минимум в районе полиразломной трансформной системы Сан-Паулу. По-видимому, макротрещиноватость также является фактором, снижающим групповую скорость сейсмических волн наравне с прогретым состоянием мантии и ее пониженной плотностью.

Уровень поля мантийных аномалий Буге в котловинах на удалениях от САХ увеличивается и выполаживается в соответствии с охлаждением литосферы по известным законам, зависящим от  $(T)^{0.5}$ , где  $T$  — геологический возраст (Сорохтин, Ушаков, 1993). Поскольку в приведенном поле был осуществлен учет осадочного слоя, главная мощность которого сосредоточена на континентальных окраинах, граница перехода континент-океан выделена по гравитационным данным более четко, чем на аномалиях без учета осадков. Эта граница близка к современным представлениям о зоне отрыва Африканской и Американских плит (Moulin et al., 2010), что подтверждает целесообразность проведенного учета осадочного слоя при гравитационном моделировании. Расчет термальной коррекции осевого минимума не проводился, поскольку в основу расчета необходимо закладывать независимое измерение, пропорциональное термальному

состоянию среды. Таковыми являются измерения теплового потока, но их плотность в пространстве весьма неравномерна, а имеющиеся промеры указывают на сильную вариацию этого параметра вдоль САХ, отличающуюся от обычно используемой простой модели, зависящей только от возраста. Вариация скоростей S-волн, пропорциональная термальному состоянию, это подтверждает, но ее детальность пока недостаточна, чтобы использовать как основу для расчета термальной коррекции.

Аномальное поле классического вида, описанного выше, имеет области наложенных минимумов, которые соответствуют ветвям суперплюмов, выходящим к поверхности вне зоны САХ. Таковыми являются: минимум магматической системы островов Зеленого Мыса, питаемый одной из главных ветвей Африканского суперплюма, и минимум Камерунской линии вулканов и подводных гор, имеющий азимут около 45° и питаемый боковым ответвлением Афарской ветви (рис. 2, врезка) Африканского суперплюма, которая видна в данных сейсмической томографии. Есть вероятность, что Камерунская линия сформирована по ослабленной зоне регматической сети. Отметим также субширотную отрицательную аномалию вдоль разлома 15°20'. Ее возможным происхождением является периодическое появление компоненты меридионального растяжения, сходной с рифтовой, при чередовании транспрессии и транстенсии вдоль данного линеамента. Кроме указанных наложенных аномальных минимумов в ЭСА присутствует парная система возвышенностей Сьерра-Леоне и Сеара, образующих симметричный рисунок минимумов поля типа «бычьих глаз» (bulls eyes) в особо крупных размерах. Такая конфигурация могла образоваться при кратковременном пересечении ветви плюма с осью САХ, при непродолжительном импульсе поступления расплава по данному ответвлению, закончившимся полным затуханием магматической активности. Возможно, на стадии затухания САХ был смещен на запад относительно этой ветви, поскольку от возвышенности Сьерра-Леоне наблюдается подобие следа горячей точки в виде цепочки гор Батиметристов. Данные по составу базальтов, разбуренных в скважине 354 39-го рейса DSDP (Kharin et al., 1977) на возвышенности Сеара, однозначно указывают на их отличие от обычных базальтов N-MORB: имеет место частичное совпадение с составами базальтов Восточно-Тихоокеанского поднятия и промежуточное положение между N-MORB и OIB (С.А. Силантьев, 2017, персональное сообщение). Это также может говорить о проникновении в ЭСА восточных ответвлений Тихоокеанского суперплюма в докайнозойское время.

## ИЗОСТАТИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ

Изоэстатическими аномалиями называется суммарный гравитационный эффект кровли масс, плавающих на более плотном и менее вязком субстрате по архимедову правилу, и их подошвы, ограниченной гипотетической поверхностью, рассчитываемой по их плотностной разности с мантией и рельефу дна:

$H = 33 - h(\rho_{ок} - 1.03)/(\rho_m - \rho_{ок})$ , где 33 км — глубина компенсации,  $h$  — рельеф дна,  $\rho_{ок}$  — плотность океанической коры, 1.03 г/см<sup>3</sup> — плотность водного слоя,  $\rho_m$  — плотность мантии. Чем больше рельеф, ограничивающий блоки сверху, тем больше глубина погружения корней блоков (модели Эйри). В случае, если плавающие массы находятся в состоянии равновесия, аномальное поле гипотетически должно иметь нулевой уровень, что на практике полностью не выполняется. Любое тектоническое воздействие, приводящее к смещению масс из состояния изостатического равновесия, формирует либо избыток масс над компенсационной поверхностью с последующим опусканием блока, либо недостаток с последующим всплытием. Вертикальные движения обоих знаков направлены к состоянию восстановленного равновесия и компенсации последствий воздействия. Таким образом, реакция среды на воздействие имеет характер отрицательной обратной связи и направлена на сохранение исходного равновесия. В случае, если действие, выводящее среду из равновесия, еще не закончено, может сложиться

ситуация, когда избыток или недостаток масс еще не компенсируется, а только нарастает.

Эффект от кровли масс (рельеф дна) уже был рассчитан на первой стадии расчета мантийных аномалий Буге. Расчет эффекта от нижней границы плавающих масс был проведен при следующих параметрах: глубина компенсационной поверхности — 33 км, радиус интегрирования — 166 км, плотность океанической коры — 2.75 г/см<sup>3</sup>, плотность воды — 1.03 г/см<sup>3</sup>, плотность мантии — 3.25 г/см<sup>3</sup>. Рельеф дна в расчетах был использован после сглаживания до частотной насыщенности, равной исходному гравитационному полю. Результат расчета изостатических аномалий приведен на рис. 3. Используемые параметры в основном совпадают со значениями, рекомендованными в работе (Артемьев и др., 1987). При них основное фоновое значение поля равно ~30 мГал.

В основном ЭСА изостатически скомпенсировано (рис. 3). Имеется вдоль САХ остаточное поле шириной не более 300 км, указывающее на размер зоны, где происходит завершение процессов компенсации новообразованных структур САХ. Положительные с большой амплитудой аномалии наблюдаются в активных магматических провинциях островов Зеленого Мыса и Камерунской линии. К западу от островов выделена обширная некомпенсированная зона, которая по данным томографии (рис. 2, врезка) сформирована ответвлением от Африканского суперплюма, но не выражена вулканическими постройками.

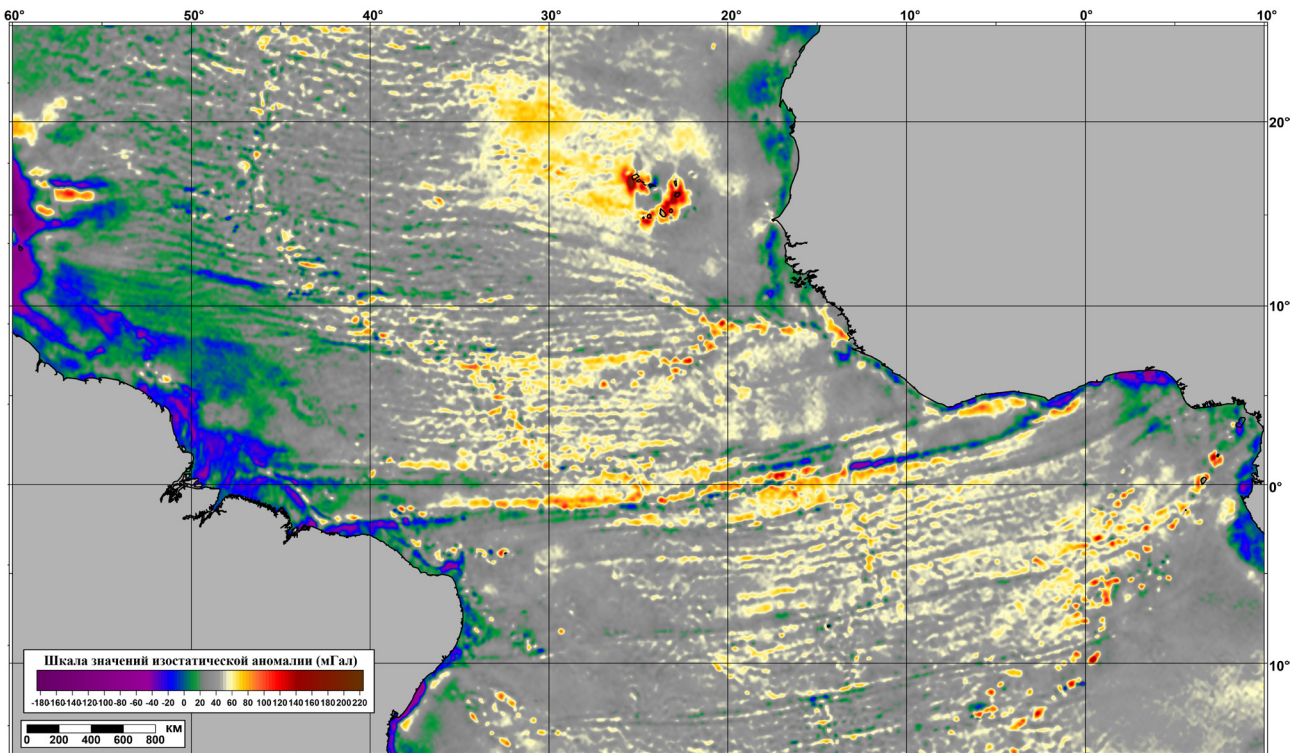


Рис. 3. Изостатические аномалии в ЭСА и его обрамлении.



Повышенный изостатический фон также имеет южный сегмент ЭСА между разломами Романш и Богданова, который в поле вариаций скоростей (рис. 2, врезка) отмечен значительным минимумом. Особо необходимо отметить контрастные положительные аномалии вдоль северного поперечного хребта разлома Романш, которые в поле аномалий в свободном воздухе (рис. 1) не были так выражены. Эти аномалии на южном обрамлении ЭСА возникли при выведении поперечного хребта разлома Романш к уровню моря с формированием коралловых построек начиная от 18 до 13 млн лет (Gasperini et al., 1997) с дальнейшим его погружением из-за избытка масс над компенсационной поверхностью.

Зона глубоких минимумов изостазии к северу от Южной Америки связана с интенсивным осадконакоплением материала, выносимого с континента, а также формированием аккреционной призмы перед Антильской дугой. Мощный осадок приводит к погружению субстрата и формирует недостаток масс в изостатическом балансе. Менее интенсивные аномалии этой природы имеются вдоль африканского шельфа. Комплекс положительных и отрицательных субширотных аномалий выделяется вдоль раздела  $15^{\circ}20'$  в районе хребта Барракуда. Общий характер отклонений изостазии в ЭСА связан с масштабными прогретыми зонами, выявленными по сейсмотомографическим признакам ветвей плюмов, с зонами интенсивного осадконакопления и зонами сдвиговых структур с переменной геодинамикой.

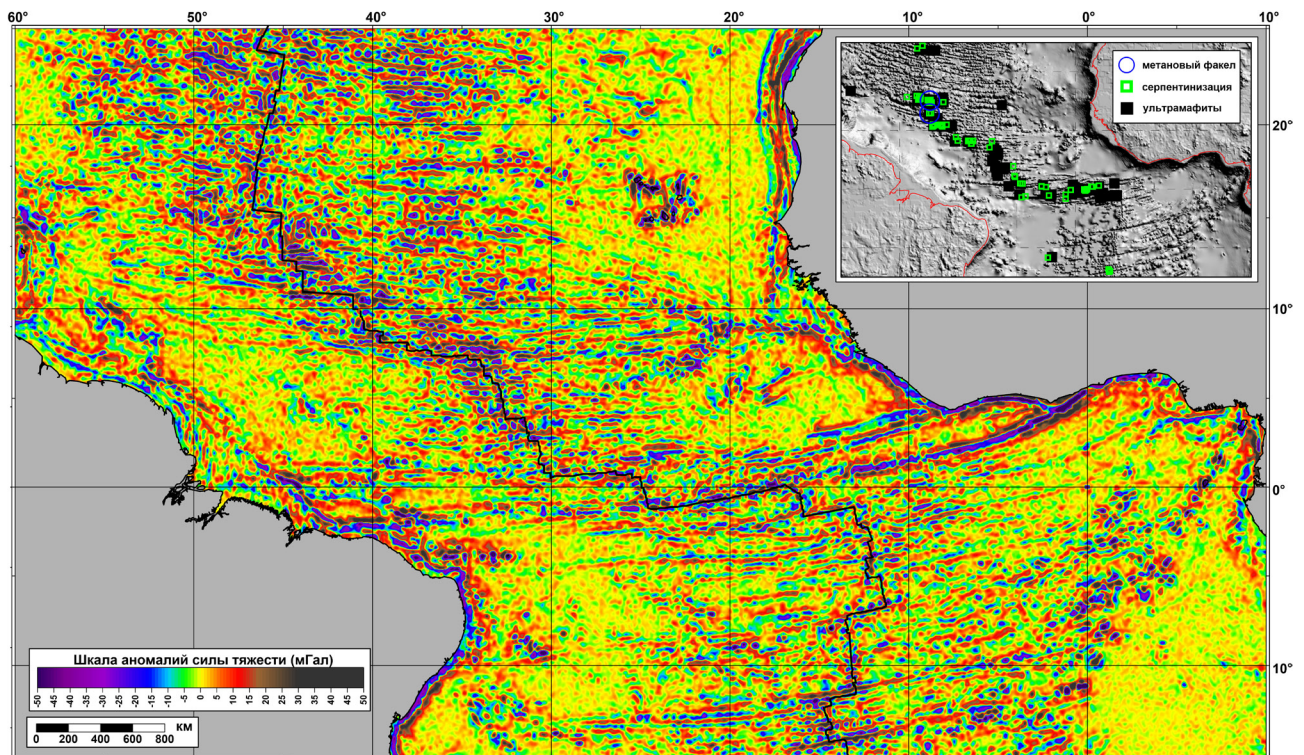
### ОСТАТОЧНЫЕ АНОМАЛИИ БУГЕ

При недостаточной детальности томографических данных и измерений теплового потока для проведения расчета термальной коррекции мантийных аномалий Буге рациональным решением является высокочастотная фильтрация полученного аномального поля. Аномалии, связанные с термальными эффектами в верхней мантии, имеют поперечные размеры не менее 300 км. Поэтому выделение коровой остаточной компоненты может быть рассчитано путем частотного разделения аномального поля. Считая, что среднее значение мощности океанической коры может быть принято равным 6 км, а среднее значение абиссальных акваторий 4 км, порядок глубины границы М может быть оценен в 10 км. Учитывая, что прилегающая часть верхней мантии связана с процессами тектонического расслоения мантии, ее серпентинизации и выведения ультраосновных пород на дно в бортах разломных трогов, увеличим глубину исследования поверхностных неоднородностей до 20 км.

Используя классическое оценочное соотношение глубины источника и эффективной ширины порождаемой им аномалии, равное  $1/3$ , получим размер длины волны  $\sim 60$  км, выше которого спектральные компоненты поля должны быть удалены. Полученная компонента поля после фильтрации длин волн  $\leq 65$  км (рис. 4) теоретически представляет эффект от источников в коре и прилегающей мантии. Сохраняется неопределенность в интерпретации этой вариации, зависящей как от мощности слоя, так и от его плотностных свойств. В общем виде оба фактора влияют на результат.

Как показано на рис. 4, большая часть остаточного поля сконцентрирована около нулевого значения, которое будем считать соответствующим среднему значению коровых параметров. Отклонения от среднего распределены следующим образом. Первой категорией аномалий являются горы и хребты. В силу особенностей суперпозиции гармоник с разными длинами волн при вычитании низкочастотной компоненты в области объекта типа гор или других возвышенностей дна будет сформирована аномалия с максимумом в центре возвышенности и с симметричными краевыми минимумами. Кроме гор, данный рисунок остаточного поля прослеживается на всех трансформных разломах и имеет примерно одинаковый амплитудный уровень. Но имеется несколько областей, где этот уровень контрастно нарушен усилением обоих симметричных значений. Это наблюдается на демаркационных разломных зонах, а также в районах, прилегающих к разломам Кейн ( $24^{\circ}$  с.ш.) и Вознесения ( $7^{\circ}$  ю.ш.), где по данным томографии вдоль САХ (Соколов, 2016) выделены малые ветви Африканского суперплюма. Геологической интерпретацией этого явления может быть выведение плотных ультраосновных пород вверх по бортам разломов и формирование там же зон, разуплотненных из-за серпентинизации последних. В области ветвей плюмов процессы дополнительного подъема и растяжения могут быть активизированы как вдоль рифта, так и вдоль разломов.

Особо необходимо отметить зону с сильными отрицательными значениями поля на флангах хребта между разломами  $15^{\circ}20'$  и Богданова, где наблюдается максимальное субширотное смещение системы сегментов САХ. По данным о драгированных породах вдоль САХ и бортов разломов, собранных А.О. Мазаровичем в базу данных (выборка 2014 г.), среди свежих и серпентинизированных ультраосновных пород в ЭСА (рис. 4, врезка) наблюдается заметная концентрация серпентинитов в упомянутом сегменте. Это говорит о том, что такое смещение приводит к более интенсивному выведению пород мантии в



**Рис. 4.** Остаточные аномалии Буге в ЭСА и его обрамлении для длин волн менее 65 км с условной глубиной менее 20 км. На врезке показано распределение ультраосновных и серпентинизированных пород по данным драгировок, а также мест обнаружения метановых факелов.

зону доступа воды, образованию серпентинитов и формированию отрицательных аномалий поля за счет разуплотнения пород. Кроме того, серпентинизация наблюдается вдоль демаркационных нарушений. Эффект дополнительного выведения пород вверх может иметь места и на флангах за счет регионального подъема, связанного с плюмами. При анализе небольших (< 50 км) изометричных отрицательных аномалий в пределах флангов САХ видно, что они часто формируют парные формы, симметричные относительно САХ («бычьи глаза»). Эти аномалии связаны с локальными импульсами продуктивного магматизма, выплавки которого в процессе спрединга расходятся в стороны. Отметим в качестве яркого примера таких аномалий цепочку, состоящую из трех пар и одной центральной аномалии непосредственно к югу от разлома Страхова (4° с.ш.). Это указывает на возможную периодичность импульсов локального магматизма.

#### АНОМАЛЬНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Аномальное магнитное поле (АМП)  $\Delta T_a$  в ЭСА и его обрамлении построено по данным грида EMAG2 с шагом  $2' \times 2'$  (Maus et al., 2009) (рис. 5). Оно представляет собой компиляцию известных набортных съемок для морской части, опубликованных карт и гридов для суши, но для низкочастотной компоненты поля с длинами волн > 330 км использовались спутниковые

данные миссии CHAMP. Интерполяция пустот между съемками осуществлялась по данным, использованным в (Müller et al., 2008). В настоящий момент это наиболее полное покрытие океанической части магнитными данными, оптимальным образом использующие источники данных различной природы. В ЭСА в силу ориентации вектора намагниченности и сильной тектонической раздробленности АМП не содержит данных с ярко выраженными линейными аномалиями, по крайней мере в детальности этого покрытия (рис. 1). Линейные аномалии проявлены к северу и югу от ЭСА. В связи с этим точность грида возрастов в ЭСА низкая.

АМП в ЭСА в отличие от его обрамления имеет мозаичный характер. Короткие отрезки аномалий являются в большей степени результатом ориентированной интерполяции, выполненной с помощью грида возрастов с плохим насыщением данными в этом районе. Природа мозаичных аномалий на флангах может быть связана с вторичными источниками намагниченности. Особо отметим усиление интенсивности поля в области симметричных плюмовых аномалий возвышенностей Сьерра-Леоне–Сеара и около 38° з.д., указывающей на возможность существования дополнительного источника магнитоактивного материала, связанного с продуктивным магматизмом. Линейные аномалии классического вида, достаточно длинные и с большой амплитудой,



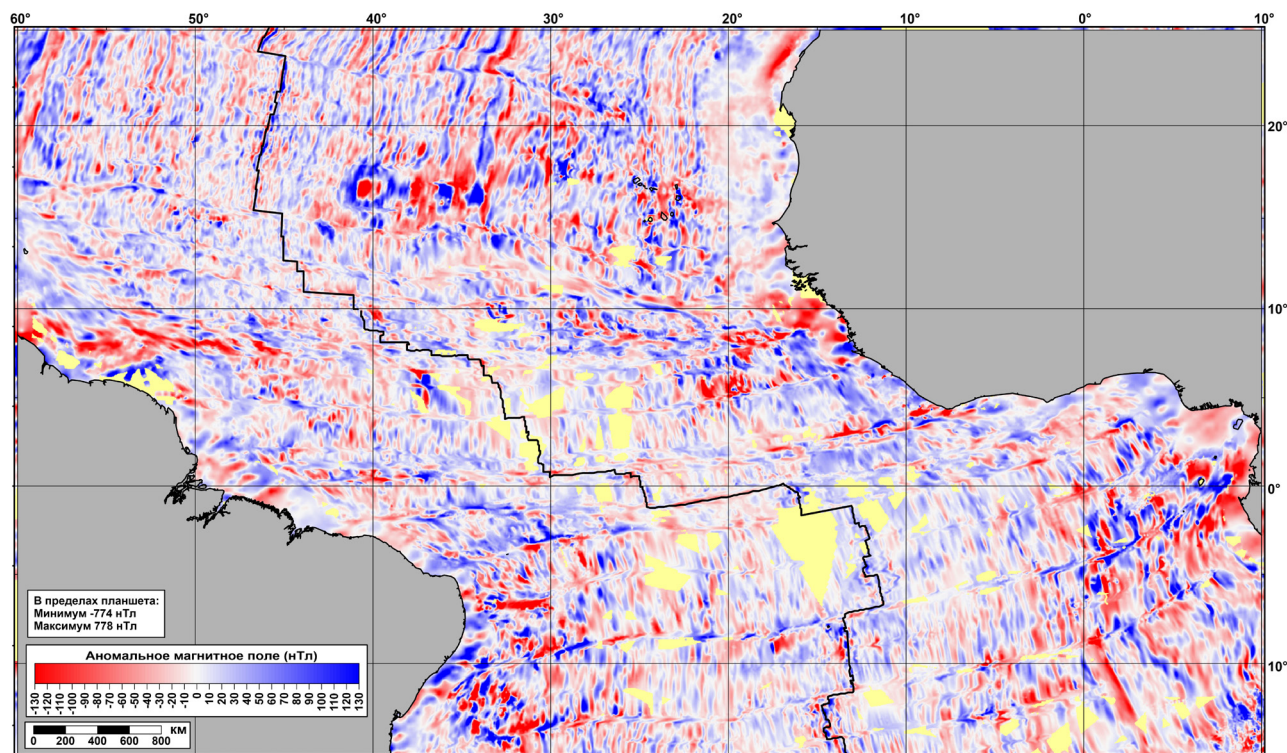


Рис. 5. АМП  $\Delta T$  по данным (Maus et al., 2009) в ЭСА и его обрамлении.

позволяющей надежно выявлять их и классифицировать, проявлены за демаркационными разломами, ограничивающими ЭСА. Осевая аномалия САХ заметно сильнее АМП на флангах, где поле затухает, но, начиная с удалений 300–400 км, по всей акватории Атлантики наблюдается закономерный рост АМП, связанный с серпентинизацией (Астафурова и др., 1996). Вторичный намагниченный материал формирует поле, которое накладывается на линейный рисунок и приводит к формированию сложной суммарной картины. Тем не менее, за счет пространственной корреляции удастся проследивать линейные формы АМП и проводить их возрастную детекцию. С питающей областью магматического центра островов Зеленого Мыса связана высокоамплитудная аномалия кольцевой формы диаметром около 200 км (40° з.д., 17° с.ш.) (рис. 5). Интересно, что эта аномальная область расположена не в районе островов, а к западу в виде цепочки кольцевых аномалий меньшего размера, формирующей подобие трека горячей точки длиной около 900 км. Собственно острова представлены мозаичным АМП меньшей амплитуды. Возможным объяснением этого явления может быть западный дрейф плит, уносящий верхние части ветви плюма, питающего магматическую систему, от колонны Кабо-Верде Африканского суперплюма. Настаивать на надежности этой гипотезы не представляется возможным из-за низкой плотности набортных наблюдений в данном районе.

#### ВЕКТОРИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕКТониКИ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО СЕКМЕНТА АТЛАНТИКИ

Данные дистанционного зондирования (рис. 1) показывают такие особенности поля силы тяжести, отражающего рельеф, как конвергенция пассивных частей трансформных разломов; увеличение числа трогов в зонах ундуций пассивных частей разломов; косоориентированные по отношению к главным структурным элементам разломные зоны и трог, структуры типа пулл-апорт в пассивных частях трансформных разломов, заполненных осадочным чехлом, и многое другое, достоверно выделяемое в конфигурации аномального поля. Все это не могло не привести к попыткам составления карт линеаментов и их интерпретации. Тектонические элементы, не находящие рационального объяснения в рамках общей теории, фиксируются на схемах достаточно редко. Примером полного отображения всего спектра видимых линейных структур ЭСА является работа (Мазарович, 2000). Кроме того, в ней дается расширенная классификация типов соотношения рифт–разлом, на основании которой в предлагаемом варианте рисовки линеаментов была сформирована дифференцированная легенда для тектонических элементов. Отметим также работу (Matthews et al., 2011), в которой вводится понятие дискордантных зон — нарушение океанического фундамента, не конформных главным тектоническим элементам: рифтовым

сегментам СОХ и трансформным разломам. Дискордантные зоны могут иметь различный угол относительно главных структурных элементов, быть извилистыми и не совпадать с общим трендом спрединга (flow lines).

Полученная в результате векторизации аномалий силы тяжести (рис. 1) карта элементов тектоники ЭСА представлена на рис. 6. Кроме того, она содержит ряд элементов, полученных на основании анализа рельефа, аномалий Буге и АМП. От предыдущих аналогов эта карта отличается значительно более дифференцированной легендой и разметкой типов линейных элементов, описанных в литературе и разделенных в картографическом отображении ЭСА. Приведем описание тектонических элементов, вынесенных на карту, и возможную геодинамическую интерпретацию их возникновения.

Главные тектонические элементы — рифтовые сегменты оси САХ, одиночные трансформные разломы и отдельно их активные зоны между рифтовыми сегментами — выделяются на всех вариантах интерпретации тектоники океанического фундамента. Общий геодинамический смысл этих элементов не меняется с периода становления тектоники плит. Рифтовые сегменты являются дивергентной границей между расходящимися плитами, вдоль которой происходит горизонтальная аккреция кристаллической коры за счет аккумуляции продуктов базальтового магматизма. Трансформные разломы соединяют геодинамически активные сегменты САХ, и их конфигурация отражает форму первичного раскалывания литосферных блоков (Wilson, 1965) с активными частями и пассивными следами расхождения блоков. Эта интерпретация по мере расширения результатов исследований обретает дополнительные детали, отличающие ее от первоначального упрощенного варианта, но основной смысл остается без изменений. Новый вариант отражает процессы тектогенеза при горизонтальном расхождении литосферных плит, которые по последним данным имеют расслоенное и блоковое строение. Рисовка главных элементов уточняется по мере развития детальности покрытия дна рельефом и потенциальными полями.

Статистический анализ главных тектонических элементов (Соколов и др., 2016) показал, что короткие (от 20 до 55 км) рифтовые сегменты САХ и зоны смещений по разломам от 10 до 80 км образуют компактную группу, которая может быть выделена в отдельный вид тектонических элементов — сдвоенные и полиразломные (три и больше разломных трога) разломные системы (рис. 6). Эти системы проявлены, как правило, над «холодными» мантийными блоками и в зонах с большим латеральным сме-

щением сегментов САХ. Причины, по которым эти системы должны выделяться в отдельный класс, связаны с низкой вероятностью существования спрединговой ячейки с габаритами в вертикальном осевом сечении  $25 \times 150$  км. На карте они показаны разными знаками. Отметим, что две самые крупные полиразломные системы обрамляют южный блок ЭСА, внутри которого конфигурация главных элементов близка к классической, а в обрамлении имеет место значительное ( $> 300$  км) смещение сегментов САХ. Сдвоенные разломы в ряде случаев также проявлены в крупных смещениях САХ, но для этого структурного типа связь с величиной смещения менее очевидна.

Зона САХ, выделяемая по изобате 4000 м, имеет тенденцию к увеличению от 300–400 км к северу от ЭСА до 700–800 км к югу. Этот тренд согласуется с увеличением скоростей спрединга (рис. 7) к югу от Эйлера полюса Африканской и Американских плит, находящегося приблизительно на  $60^\circ$  с.ш., и соответствующими закономерностями рельефа и скоростей, описанных в (Сорохтин, Ушаков, 1993).

Отдельным знаком на карте (рис. 6) показаны разломы-«отшельники», согласно определению (Мазарович, 2000). Эти структуры не смещают ось САХ и не имеют пересечения с ней. Генезис этих структур не ясен, но их происхождение может объясняться выравниванием различающихся скоростей спрединга на обоих флангах трансформы, приводящем к его исчезновению. Это предположение основано на анализе карты полускоростей спрединга (рис. 7) для западного фланга САХ на широте около  $15^\circ$  ю.ш., где после разницы скоростей, достигавшей 60% в области изохроны 16 Ма, произошло их выравнивание, и для изохроны 4 Ма разница уже отсутствует.

Особый интерес вызывают «слепые трог» по определению А.О. Мазаровича (2000), которые представляют собой ответвления от одиночных трансформных разломов, расположенные параллельно последним (рис. 6) (параллельная ветвь в терминах карты). При постоянном расстоянии между пассивными частями разломов к северу и югу от ответвления, имеющих конформную пространственную ориентацию, их происхождение неясно. Имеются две ситуации. Первой является симметричное проявление ответвлений по обе стороны САХ, что указывает на осевое происхождение данных форм. Формирующим фактором может быть вдольосевое перетекание вещества (Аплонов, Трунин, 1995), которое, кроме перескоков оси САХ в пределах сегмента, может привести к смещению разломных ограничителей сегмента САХ и вырождению сегментирующего элемента. Другими словами, происходит объединение сегментов рифта и сокращение числа



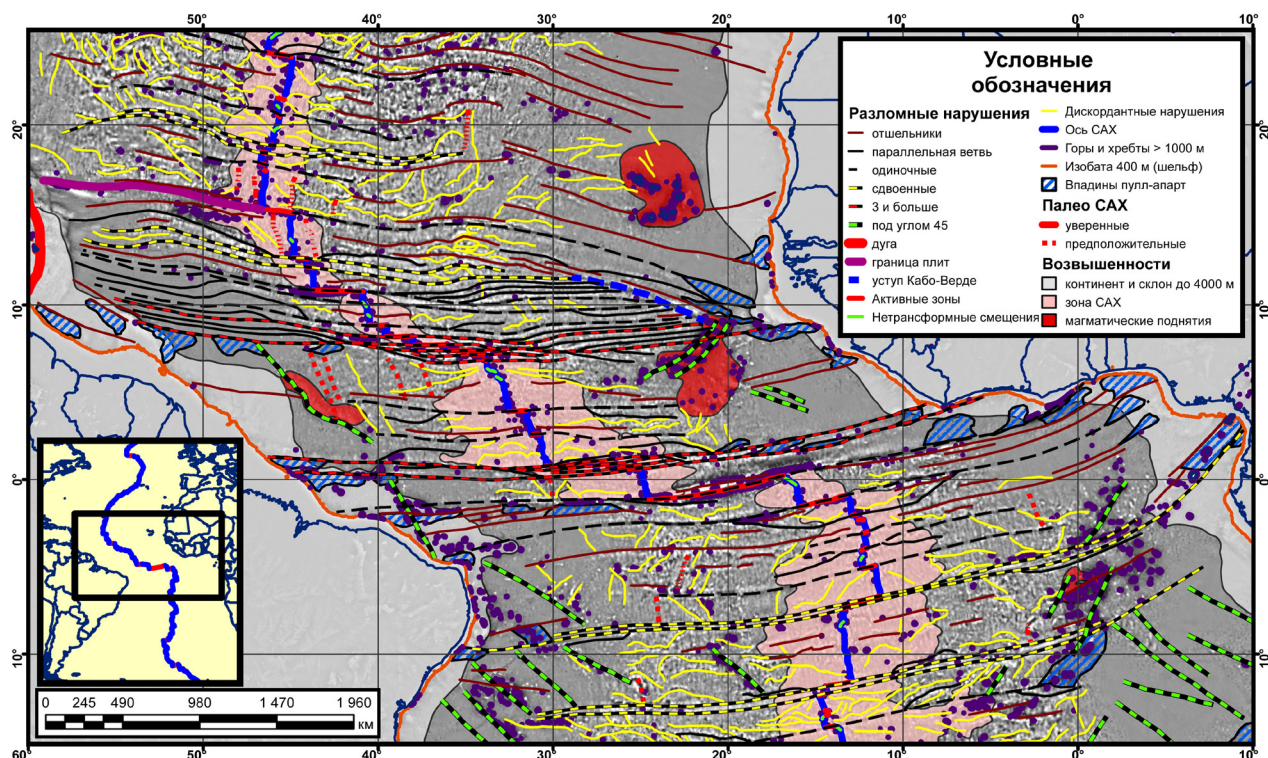


Рис. 6. Тектоническая карта ЭСА и его обрамления, составленная на основе векторизации линейных элементов в данных спутниковой альтиметрии и общих соображений, вытекающих из геофизических данных.

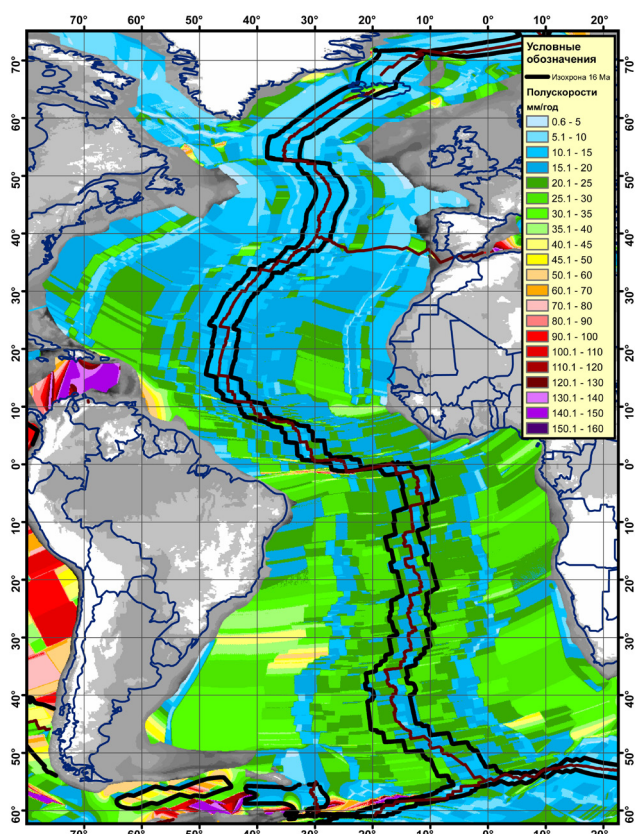


Рис. 7. Полускорости спрединга, вычисленные по данным АМП  $\Delta T_a$  (Müller et al., 2008) и изохрона 16 Ма.

разломов. Большинство ответвлений ориентированы точкой стыковки к САХ, что указывает на сокращение числа сегментов во времени. Есть исключение, расположенное на северном борту

разлома Сан-Паулу, в котором сегментация с течением времени усложнилась — произошло появление ветви около 60 Ма.

Другой ситуацией является несимметричное расположение параллельных ветвей. Этот элемент проявлен в северном сегменте ЭСА между полиразломной системой Долдрамс – Вернадского – 7°24' с.ш. – Богданова – 6°52' с.ш. и разломом Вима. Особенностью этих ответвлений является удвоение общего числа трогов по сравнению с обычными, смещающими сегменты САХ. Точки стыковки расположены в районе ундуляции пассивных частей обычных разломов, проявленных во всей северной Атлантике в возрастном интервале от ~50 до ~70 млн лет (рис. 8), во время которого имел место отскок Эйлера полюса и формирование недоразвитого рифта моря Лабрадор к западу от Гренландии. Поскольку известная по данным (Bonatti et al., 2005) перестройка ориентации разлома Вима, расположенного в этом сегменте, увязывается по времени с формированием Антильской дуги и ее встречным к оси САХ продольным воздействием на данный сегмент Атлантики и формированием кинк-банд структуры, можно предположить, что отмеченная система ответвлений разломов является следствием сопутствующих деформационных процессов. Эти процессы развивались от уже имевшейся ундуляции структур фундамента в восточном направлении и приводили к возникновению дополнительных трогов аналогично



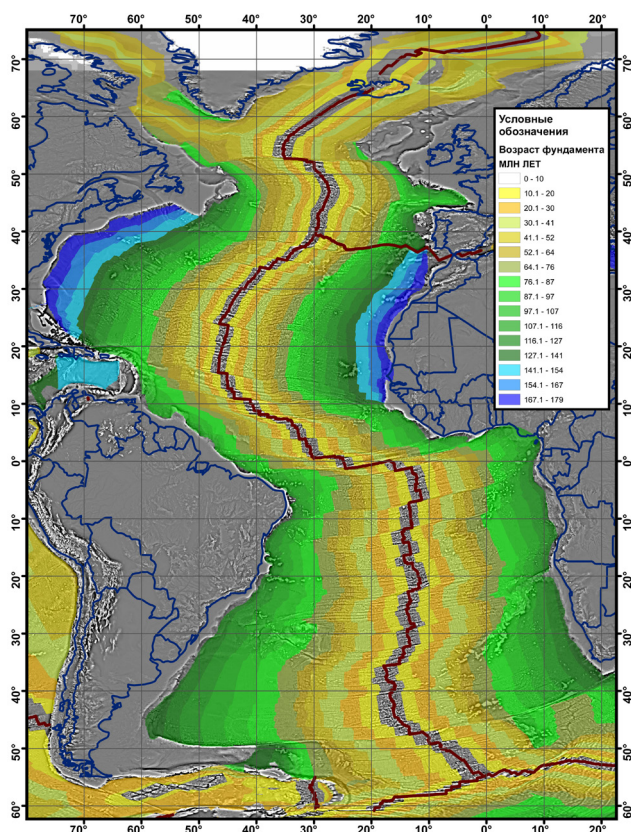


Рис. 8. Возраст океанического фундамента, вычисленный по данным АМП  $\Delta T_a$  (Müller et al., 2008).

кливажированию и деформациям осадочного чехла.

Дискордантные зоны (Matthews et al., 2011) выделены в отдельный элемент тектонической карты. Они также обладают разделением на подгруппы с симметричным рисунком относительно САХ и несимметричным. Большинство этих зон, выраженное симметричными относительно САХ элементами (рис. 6), заключено в сегментах между трансформными разломами, не имеющими изгибов. Это указывает на отсутствие связи дискордантных зон с общим вектором спрединга, и на то, что их происхождение, также как и в случае с симметричными параллельными ветвями, связано с вдольосевыми процессами внутри сегмента. Подобное мнение было высказано в (Fairhead, Wilson, 2005) относительно дискордантных зон к северу от разлома Кейн, охватывающих возрастной диапазон от 25 Ма до настоящего времени, но симметричный рисунок этих образований может охватывать почти всю ширину океана. Это указывает на наличие постоянно действующих вдольосевых процессов. Другим фактором, способным влиять на структурообразование вдоль прямых трансформных разломов, является различие скорости спрединга между сегментами (рис. 7). Так как разница скоростей между соседними блоками может достигать 100% и более, сдвиговые процессы вдоль пассивных частей

разломов, сопровождающиеся деформациями, вполне допустимы. На более медленном фланге могут возникать трещины отрыва, которые при длительном существовании разницы скоростей в состоянии сформировать дискордантный элемент.

Несимметричные дискордантные элементы (рис. 6) образуют систему, ориентированную к трансформным разломам под углом около  $45^\circ$ . Преимущественным направлением является северо-западное (Мазарович, Соколов, 2002), хотя реже встречается и северо-восточное. Прямые и длинные зоны этого вида выделены в отдельный элемент тектонической карты. Ориентация примерно под одинаковым углом к рифту и разломам указывает на реализацию смещений вдоль сколовых напряжений. Это означает упругое состояние литосферы в целом на больших (до 1000 км) расстояниях, хотя уже установленным является расслоенное и блоковое состояние. Таким образом, литосфера обладает двойственной природой, являясь упругой средой и блоковым раздробленным комплексом одновременно. Возникновение сколовых напряжений и связанной с ними системой трещиноватости может интерпретироваться как результат периодического изменения режима вращения Земли, порождающего регматическую сеть (Долицкий, 1985) и изменение кривизны поверхности. Отметим, что длинные нарушения косо ориентации выделены на абиссали вдали от флангов САХ, где литосфера остывшая по сравнению с рифтовой частью.

Дополнительным элементом карты (рис. 6) являются нетрансформные смещения оси САХ, которые представляют собой зоны смещения сегментов рифта неортогонально оси САХ и без трансформного разлома. Причиной возникновения этих структур является наличие контрастно низкой вязкости локальных участков мантии, возникающей при наличии аномально прогретых участков, выявляемых по данным сейсмотомографии (рис. 2, врезка), либо при наличии зон серпентинизации ультраосновных пород (рис. 4, врезка). Последний фактор широко обсуждается в литературе, например (Разницын, 2010). Зона нетрансформных смещений в районе  $6^\circ$  с.ш. была детально закартирована в 22-м рейсе НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН РАН, 2000) (Mazarovich et al., 2001). Из приведенных в этой работе детальных карт многолучевого эхолотирования также видно, что нетрансформные смещения в этом сегменте комбинируются с нарушениями северо-западной ориентации. Данный район по результатам многочисленных драгировок, проведенных как ГИН РАН, так и исследователями других институтов, помимо базальтов и габбро представлен серпентинизи-



рованными ультраосновными породами, что в данном сегменте САХ подтверждает версию происхождения нетрансформных смещений.

В легенду карты (рис. 6) внесены палеооси САХ, имеющие в пределах планшета предполагаемый характер. Поскольку по данным анализа АМП возможны кратковременные перескоки оси на небольшие расстояния в пределах первых магнитных хронов (Аплонов, Трунин, 1995), вероятность существования несимметричных палеоосей на любом из флангов САХ достаточно велика. Достоверные данные на крупные по удалению перескоки есть на переход оси из хребта Эгир в хребет Кольбенсей (Северная Атлантика) и на переход оси на восточном фланге САХ к югу от разлома Агульяс. Остальные предполагаемые палеооси, выделяются по морфологии рельефа, сходной с морфологией САХ, и, в ряде случаев, по форме АМП. Причиной перескока могут быть вариации поля напряжений, меняющие текущую дислокацию условий растяжения.

Новым элементом тектоники глубоководной части являются впадины пулл-апарт (рис. 6), примыкающие к пассивным частям трансформных разломов. Конфигурация этих впадин, имеющая в ряде случаев четкую ромбовидную форму, читается по аномалиям гравитационного поля в свободном воздухе (рис. 1). Наиболее вероятными механизмами их возникновения являются: разница скоростей спрединга в сегментах между разломами, смещение по пассивным частям при развороте блока литосферы с несколькими разломами и дополнительное смещение при боковом воздействии со стороны Антильской дуги. Анализ карты показывает, что эти впадины в основном сосредоточены вдоль демаркационных границ севера, юга ЭСА и внутри него. Наибольшее проявление впадин имеет место около границ северного сегмента, содержащего также максимальную плотность несимметричных параллельных ветвей дополнительных разломных трогов. Это указывает на предпочтительность механизма внешнего воздействия. Большинство впадин расположено в пределах 200-мильной зоны прибрежных государств, но ромбовидная структура к северу от возвышенности Сьерра-Леоне в международных водах была пройдена маршрутным геофизическим промером в 23-м рейсе НИС «Академик Николай Страхов» (ГИН РАН, 2006) (Сколотнев и др., 2007). На одном из профилей на южном борту впадины были обнаружены надвиговые структуры южной вергентности, происхождение которых никак не вписывается в действие классической системы сил. Обнаруженные деформации, имеющие современный возраст, нуждаются в наличии субмеридиональной компоненты движения масс. Обеспечить ее может

либо дифференцированное по скорости субмеридиональное смещение блоков плит, либо субширотное сдвиговое смещение вдоль не прямой траектории разрыва, формирующее так называемые изгибы торошения (Woodcock, Fisher, 1986). Поскольку инструментальных данных по скоростям движения на акватории практически нет, первую версию обосновать трудно, но вторая версия, основанная на широтном смещении вдоль не прямой траектории, имеет веские основания. Они следуют из конфигурации потенциальных полей и данных сейсморазведки. Именно вдоль таких разрывов формируются впадины пулл-апарт. Надвиговые структуры субмеридиональной вергентности обнаружены вдоль борта другой впадины, выявленной по альтиметрии (рис. 1) вдоль пассивной части разлома Шарко около дельты Нигера (Briggs et al., 2009). Эта находка, по мнению авторов, указывает на субмеридиональное сжатие пассивных частей разлома в позднемиловое время, возникшее при сдвиговых смещениях.

На тектонической карте (рис. 6) показаны возвышенности, сложенные продуктами магматизма повышенной продуктивности. Поднятия с современным магматизмом сопоставляются с ветвями Африканского суперплюма. Парные поднятия в ЭСА, сложенные базальтами, отличными по составу от N-MORB, соответствуют затухшему в настоящее время магматическому импульсу, шедшему по неактивной в настоящее время ветви суперплюма (рис. 2).

Ряд единичных элементов в пределах планшета показаны отдельными знаками (рис. 6). Антильская дуга является единственной структурой этого вида, попадающая в планшет, но она важна для объяснения ряда необычных явлений в океаническом сегменте с пассивными окраинами. Граница плит, проходящая по западной части разлома 15°20', формирует с САХ тройное сочленение, на что указывают многочисленные данные разной природы (GPS, сейсмичность). Уступ Кабо-Верде показан отдельным знаком, как уникальная структура, являющаяся восточным продолжением разлома Меркурий, вдоль которой происходит утыкание несимметричных параллельных ответвлений северной части ЭСА. Данное явление было названо конвергенцией пассивных частей трансформных разломов и в данный момент не имеет четкой геодинамической интерпретации.

Шельф на карте показан по изобате 400 м, поскольку ряд шельфовых областей имеют более глубокий уровень, чем 200 м, а в плане положение изобаты 400 м на склоне в масштабе карты практически не отличается от изобаты 200 м. Подводные горы и хребты показаны по превышению высокочастотного остаточного

рельефа GEBCO на 30-секундной сетке надглаженным рельефом (аналог цоколя) более 1000 м. Горы и хребты отображены изобатой + 1000 м по покрытию остаточного рельефа. Из карты следует, что большая часть гор сгруппированы в цепочки, ориентация которых совпадает либо с пассивными частями трансформных разломов, либо с нарушениями, имеющими ориентацию ~45° относительно главных структурных элементов. Анализ возрастов пород, слагающих эти постройки, мог бы показать их происхождение и эволюцию, но опробование дна вне оси САХ в пределах планшета слишком мало для того, чтобы делать какие-либо определенные выводы. Для Южной Атлантики анализ возрастов цепочек гор показал несовпадение с возрастом субстрата и непоследовательное появление гор в пространстве (Сколотнев, Пейве, 2017).

Перечисленные тектонические элементы, вынесенные на карту в дополнение к главным элементам, имеющим классическое объяснение, могут интерпретироваться как результат действия следующих факторов, упомянутых в работе в связи с анализом представленных материалов:

1. Вдольосевое перетекание прогретого вещества, приводящее к образованию дискордантных зон и вырождению сегментации САХ трансформными разломами или появлению дополнительной сегментации (Аплонов, Трунин, 1995).

2. Взаимодействие блоков океанической литосферы на разных флангах трансформных разломов, включая пассивные части, возникающее из-за разной скорости спрединга в блоках (Соколов, 2016).

3. Возникновение дополнительной разломной сети из-за изменения режима вращения Земли и кривизны поверхности (Долицкий, 1985).

4. Дополнительное смещение северной части ЭСА при боковом воздействии со стороны Антильской дуги (Bonatti et al., 2005).

## ВЫВОДЫ

ЭСА выделяется контрастными сочетаниями геофизических параметров по сравнению с его северным и южным обрамлением: «холодная» линза в верхней мантии по данным сейсмотомографии, сочетания гравитационных аномалий Буге и изостатических, повышенная плотность полиразломных и сдвоенных трансформных систем. Морфология пассивных частей разломных зон ЭСА указывает на существование сдвигового геодинамического режима с переменными характеристиками.

При неравномерной плотности набортных промеров объективная картина для региональ-

ного анализа структур может быть получена по данным дистанционных зондирований методом альтиметрии. Выделяется четкая сегментация ЭСА по различному уровню поля и плотности линеаментов. Наблюдаются следующие особенности поля: конвергенция пассивных частей трансформных разломов; увеличение числа трогов в зонах ундуляций пассивных частей разломов; косоориентированные по отношению к главным структурным элементам разломные зоны и трог, а также приуроченные к ним внутриплитные землетрясения; возникновение структур типа пулл-апарт в пассивных частях трансформных разломов; наложенные цепочки вулканических построек, ориентированные косо к основным структурным элементам, а также вдоль бортов крупных трансформных разломов, дискордантные зоны.

Аномалии Буге в ЭСА имеют следующую геодинамическую интерпретацию. Ширина осевого минимума увеличивается к югу в соответствии с удалением от полюса вращения плит и увеличением скорости спрединга. Глубина осевого минимума имеет максимальный уровень в ЭСА и минимальные значения при пересечении САХ с ветвями суперплюмов, которые также формируют парные минимумы за пределами САХ. Уровень аномалий Буге в котловинах увеличивается в соответствии с охлаждением литосферы.

Характер отклонений изостазии в ЭСА от скомпенсированного состояния связан с масштабными прогретыми зонами, выявленными по сейсмотомографическим признакам ветвей плюмов, с зонами интенсивного осадконакопления и зонами сдвиговых структур с переменной геодинамикой. Также вдоль САХ имеется остаточное положительное поле шириной не более 300 км. Особо необходимо отметить контрастные положительные аномалии вдоль северного поперечного хребта разлома Романш, расположенного на южном обрамлении ЭСА.

Остаточные аномалии Буге показывают аномальные зоны, сформированные как результат выведения плотных ультраосновных пород вверх по бортам разломов и формирование разуплотненных из-за серпентинизации зон. Также выделяется зона с сильными отрицательными значениями поля на флангах хребта между разломами 15°20' и Богданова с максимальным субширотным смещением системы САХ, где по данным о составе пород среди ультрамафитов велика доля сильно серпентинизированных разновидностей. Интенсивная серпентинизация наблюдается вдоль демаркационных нарушений. Наблюдаются парные симметричные аномалии, связанные с локальными импульсами высокопродуктивного магматизма, формирующие в ряде случаев симметричные цепочки.



Природа мозаичных аномалий на флангах обусловлена серпентинизацией пород верхней мантии, и в случае парных возвышенностей Сьерра-Леоне – Сеара продуктивным магматизмом. Линейные аномалии классического вида проявлены за демаркационными разломами, ограничивающими ЭСА. Осевая аномалия САХ сильнее АМП на флангах. Начиная с удалений 300–400 км, наблюдается закономерный рост АМП. Вторичный намагниченный материал формирует поле, которое накладывается на линейный рисунок и приводит к формированию сложной суммарной картины. С питающей областью магматического центра островов Зеленого Мыса связана высокоамплитудная аномалия кольцевой формы диаметром около 200 км, смещенная к западу от них, что может быть объяснено западным дрейфом плит.

Тектонические элементы Экваториального Сегмента Атлантики, показанные в новой версии карты, условно делятся на две группы: главные и дополнительные. Главные элементы — рифтовые сегменты САХ, одиночные трансформные разломы и, отдельно, их активные части, нетрансформные смещения, зона САХ с флангами и отдельные магматические возвышенности — имеют геодинамическую интерпретацию, вполне согласованную с представлениями о параметрах основных действующих горизонтальных сил тектоники плит вне зависимости от источника этих сил и его комбинации с ветвями суперплюма.

Дополнительные элементы — полиразломные системы, разломы-«отшельники», параллельные ветви и дискордантные нарушения, как симметричные, так и несимметричные, палеооси спрединга, впадины пулл-апарт — могут интерпретироваться, как результат действия следующих дополнительных факторов:

1. Вдольосевое перетекание прогретого вещества, приводящее к образованию дискордантных зон и вырождению сегментации САХ трансформными разломами или появлению дополнительной сегментации.

2. Взаимодействие блоков океанической литосферы на разных флангах трансформных разломов, включая пассивные части, возникающее из-за разной скорости спрединга в блоках.

3. Возникновение дополнительной разломной сети из-за изменения режима вращения Земли и кривизны поверхности.

4. Дополнительное смещение северной части ЭСА при боковом воздействии со стороны Антильской дуги и возникновение соответствующих деформаций.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 18-55-7806 «Новый тип межплитных границ: океанские мегатрансформы»

(руководитель — С.Г. Сколотнев). Оцифровка тектонических элементов, связанных с формированием разломных зон, выполнена частично в рамках темы госзадания № 0135-2016-0013 Геологического института РАН «Опасные геологические процессы в Мировом океане: связь с геодинамическим состоянием коры и верхней мантии и новейшими движениями» (руководитель — А.О. Мазарович).

#### Список литературы

- Аглонов С.В., Трунин А.А.* Миграция локальной нестабильности спрединга вдоль оси дивергентной границы: Срединно-Атлантический хребет между трансформными разломами Марафон и Кейн // *Физика Земли*. 1995. № 9. С. 24–34.
- Артемов М.Е., Бабаева Т.М., Войдецкий И.Е. и др.* Изостазия и гравитационное поле северной Атлантики. М.: МГК, 1987. 156 с.
- Астафурова Е.Г., Городницкий А.М., Лукьянов С.В., Мещенков С.П.* Природа магнитных аномалий и строение океанической коры Срединно-Атлантического хребта и прилегающих котловин в пределах Канаро-Багмаского геотраверса // *Природа магнитных аномалий и строение океанической коры* / Под ред. Городницкого А.М. М.: Изд. ВНИИРО, 1996. С. 171–202.
- Бонатти Э.* Происхождение крупных разломных зон, смещающих Срединно-Атлантический Хребет // *Геотектоника*. 1996. № 6. С. 5–16.
- Долицкий А.В.* Образование и перестройка тектонических структур. М.: Недра, 1985. 219 с.
- Мазарович А.О., Агапова Г.В., Ефимов В.Н. и др.* Пассивные части трансформных разломов Атлантического океана между 16° с.ш. и экватором // *Геотектоника*. 1997. № 5. С. 85–94.
- Мазарович А.О.* Геологическое строение Центральной Атлантики: разломы, вулканические сооружения и деформации океанского дна. М.: Научный Мир, 2000. 176 с.
- Мазарович А.О., Соколов С.Ю.* Разломные зоны северо-западного простирания Центральной Атлантики // *Геотектоника*. 2002. № 3. С. 87–94.
- Разницин Ю.Н.* Признаки эксгумации ультрамафитов на хребте Книповича (Северная Атлантика) // *ДАН*. 2010. Т. 431. № 6. С. 788–791.
- Сколотнев С.Г., Турко Н.Н., Соколов С.Ю. и др.* Новые данные о геологическом строении зоны сочленения Зеленомысского поднятия, котловины Зеленого мыса и подводных гор Батиметристов (Центральная Атлантика) // *ДАН*. 2007. Т. 416. № 4. С. 525–529.
- Сколотнев С.Г., Пейве А.А.* Состав, строение, происхождение и эволюция внеосевых линейных вулканических структур Бразильской котло-

- вины (Южная Атлантика) // Геотектоника. 2017. № 1. С. 59–80.
- Соколов С.Ю. Особенности тектоники Срединно-Атлантического хребта по данным корреляции поверхностных параметров с геодинамическим состоянием верхней мантии // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 4. Вып. С. 88–105.
- Соколов С.Ю. Атлантико-Арктическая рифтовая система: подход к геодинамическому описанию по данным сейсмической томографии и сейсмичности // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 4. Вып. 36. С. 79–88
- Соколов С.Ю., Зарайская Ю.А., Мазарович А.О. и др. Пространственная неустойчивость рифта в полиразломной трансформной системе Сан-Паулу, Атлантический океан // Геотектоника. 2016. № 3. С. 3–18.
- Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Природа тектонической активности Земли // Итоги науки и техники. Сер. Физика Земли. М.: ВИНТИ, 1993. 292 с.
- Antobreh A.A., Faleide J.I., Tsikalas F., Planke S. Rift-shear architecture and tectonic development of the Ghana margin deduced from multichannel seismic reflection and potential field data // Marine and Petroleum Geology. 2009. V. 26. № 345–368.
- Bonatti E., Brunelli D., Buck W.R. et al. Flexural uplift of a lithospheric slab near the Vema transform (Central Atlantic): Timing and mechanisms // Earth and Planetary Science Letters. 2005. V. 240. № 3. P. 642–655.
- Briggs S.E., Davies R.J., Cartwright J., Morgan R. Thrusting in oceanic crust during continental drift offshore Niger Delta, equatorial Africa // Tectonics. 2009. V. 28. TC1004. P.1–16. doi:10.1029/2008TC002266, 2009.
- Divins D.L. Total Sediment Thickness of the World's Oceans & Marginal Seas // NOAA. National Geophysical Data Center. Boulder. CO. 2003. (<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/sedthick/sedthick.html>).
- ETOPO5 Set. Global Relief Data CD. 1993. NOAA Product # G01093-CDR-A0001.
- Fairhead J.D., Wilson M. Plate tectonic processes in the South Atlantic Ocean: Do we need deep mantle plumes? // Geological Society of America Special Papers. 2005. V. 388. P. 537–553. doi:10.1130/0-8137-2388-4.537.
- Gasperini L., Bonatti E., Ligi M. et al. Stratigraphic Numerical Modelling of a Carbonate Platform on the Romanche Transverse Ridge, equatorial Atlantic // Marine Geology. 1997. V. 36. Iss. 3–4. P. 245–257.
- Kharin G.S., Arakeljan M.M., Dmitriev Y.I. Petrology and K–Ar Age of Basaltic Rocks, Sites 353, 354, and 355, DSDP Leg 39 // Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project. 1977. V. XXXIX. P. 547–553. doi:10.2973/dsdp.proc.39.123.1977.
- Matthews K.J., Müller R.D., Wessel P., Whittaker J.M. The tectonic fabric of the ocean basins // JGR. 2011. V. 116. № B12109. doi:10.1029/2011JB008413.
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H. et al. EMAG2: A 2-arc-minute resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne and marine magnetic measurements // Geochemistry Geophysics Geosystems. V. 10. № 8. P. 1–12. doi:10.1029/2009GC002471.
- Mazarovich A.O., Sokolov S.Yu., Turko N.N., Dobrolyubova K.O. Seafloor topography and structure of the rift zone of the Mid-Atlantic Ridge between 5° and 7°18'N // Russian Journal of Earth Sciences. V. 3. № 5. November 2001. P. 353–370.
- Moulin M., Aslanian D., Unternehr P. A new starting point for the South and Equatorial Atlantic Ocean // Earth-Science Reviews. 2010. V. 98. P. 1–37. doi:10.1016/j.earscirev.2009.08.001.
- Müller R.D., Sdrolias M., Gaina C., Roest W.R. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2008. V. 9. № 4. P. 1–19. doi:10.1029/2007GC001743.
- Sandwell D.T., Smith W.H.F. Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS-1 Satellite Altimetry // JGR. 1997. V. 102. № B5. P. 10039–10054. (<ftp://topex.ucsd.edu/pub/>).
- Sandwell D.T., Smith W.H.F. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate // JGR. 2009. V. 114. № B1. P.1–18. doi:10.1029/2008JB006008.
- Schaeffer A.J., Lebedev S. Global shear speed structure of the upper mantle and transition zone // Geophysical Journal International. 2013. V. 194. № 4. P. 417–449.
- Wilson J.T. A New Class of Faults and their bearing on Continental Drift // Nature. 1965. V. 207. № 4995. P. 343–347.
- Woodcock N.H., Fisher M. Strike-slip duplexes Journal of Struct. Geol. 1986. V. 8. № 7. P. 725–735.



КОМПОНОВКА ОБНОВЛЕННОЙ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ КАРТЫ  
**COMPILATION OF UPDATED TECTONIC MAP FOR EQUATORIAL SEGMENT  
OF ATLANTIC BASED ON POTENTIAL GEOPHYSICAL FIELD DATA**

**S.Y. Sokolov**

*Geological institute RAS, Moscow, 119017*

New data on potential geophysical fields make possible the significant actualization of Atlantic equatorial segment tectonic elements vectorization, which could be recognized in the anomalies fields mosaic. To complete this were used free air gravity anomalies derived from satellite altimetry, Bouguer and isostatic anomalies, seismic tomography, residual Bouguer anomalies, anomalous magnetic field, data on upper mantle rocks, spreading rates and oceanic basement age. Detected tectonic elements are compiled into the map, in which they are conditionally subdivided into two groups: basic and additional. Basic elements are: rift segments of Mid Atlantic Ridge (MAR), single transform faults and their active parts separately, nontransform displacements, MAR area with flanks and separate magmatic rises have geodynamic interpretation, which coincides to parameters of main acting horizontal forces of plate tectonic and its combination with mantle plumes branches. Additional elements are: multitransform fault systems, faults-«hermits», parallel branches and discordant displacements — symmetrical and asymmetrical, paleo spreading centers, pull-apart basins — could be interpreted as the result of additional tectonic fabric factors acting.

*Keywords: tectonic map, potential geophysical fields, Bouguer anomalies, tectonic fabric factors.*